

尾矿库植物修复区土壤分维特征 及其与物理力学性质的相关性

韩震宁¹, 郝喆^{1*}, 宁方舟², 杨青潮³

(1. 辽宁大学 环境学院, 辽宁 沈阳 110036; 2. 辽宁省地矿集团生态修复有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032;
3. 山东交通职业学院 公路与建筑系, 山东 潍坊 261206)

摘要:为探究尾矿库植物修复区土壤分维特征与物理力学性质的相关性,对尾矿库植物修复区土壤的微观结构和物理力学性质进行检测,获取并分析土壤分维特征及其与物理力学性质的相关性.本文选取本钢集团歪头山铁矿尾矿库现场 4 个不同台阶的土壤作为研究对象,通过扫描电子显微镜(SEM)获取土体微观结构,并采用图像处理软件进行定量分析;同时对土壤孔隙比、渗透系数、密度、内聚力、内摩擦角等物理力学参数进行检测,据此分析尾矿库植物修复区土壤分形维数与其物理力学参数之间的相关性.结果表明:土壤分形维数随着种植年限的增加而增加;土壤分形维数与土壤天然密度呈正相关,土壤分形维数对天然密度影响较显著;土壤分形维数与渗透系数呈不显著相关,与孔隙比、内摩擦角和内聚力呈显著负相关.研究结果可为尾矿库植物修复提供客观依据.

关键词:尾矿库植物修复区土壤;分形维数;物理力学参数;相关性

中图分类号:TD824.7 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)04-0064-07

Soil Fractal Characteristics and Their Correlation with Physical and Mechanical Properties in the Plant Remediation Area of Tailings Pond

HAN Zhenning¹, HAO Zhe¹, NING Fangzhou², YANG Qingchao³

(1. College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China;
2. Liaoning Geology and Mineral Resources Group Ecological Restoration Co., Ltd., Shenyang 110032, China;
3. Department of Highway and Architecture, Shandong Vocational College of Transportation, Weifang 261206, China)

Abstract: To investigate the correlation between soil fractal characteristics and physical and mechanical properties in the plant remediation area of tailings ponds, the microstructure and physical and mechanical properties of the soil in the tailings pond plant remediation area were tested, and the soil fractal characteristics and their correlation with physical and mechanical properties were obtained and analyzed. This article selects four different steps of soil from the Waitoushan iron mine tailings pond of Benxi Iron and Steel Group as the research object. The microstructure of the soil is obtained through scanning electron microscope (SEM), and the microstructure of the soil is quantitatively analyzed using image processing software. Physical and mechanical parameters such as soil porosity, permeability coefficient, density, cohesion, and internal friction angle are tested to analyze the correlation between the fractal dimension of the soil in the plant remediation area of the tailings pond and its physical and mechanical parameters. The results showed that the fractal dimension of soil increased with the increase of planting years; The fractal dimension of soil is positively correlated with the natural density of soil, and as the fractal dimension of soil increases, it has a significant impact on the natural density;

收稿日期:2023-10-14

基金项目:辽宁省科技计划资助项目(2019JH8/10300107;2020JH2/10300100)

*通信作者, E-mail: haozhe2004@163.com

The fractal dimension of soil is not significantly correlated with permeability coefficient, but significantly negatively correlated with porosity, internal friction angle, and cohesive force. The research results can provide objective basis for plant restoration of tailings ponds.

Keywords: soil in the plant remediation area of tailings pond; fractal dimension; physical and mechanical parameters; relevance

尾矿库由筑坝拦截谷口或围地构成,在对堆放金属或非金属矿山进行矿石选别后,用于堆放排出尾矿或其他工业废渣.目前我国大量尾矿库开展了植物修复工作,植物修复区形成的根际土与裸尾矿土壤颗粒组成存在较大差异^[1].探讨尾矿库植物修复区土壤结构特征和物理力学性质并分析其相关性,具有较大的现实意义.

目前,分形维数已被用来研究土壤及其根系微观检测与其物理力学之间的关系,并成为分形理论一大重要研究方向^[2-3].林立文等^[4]研究亚热带土壤颗粒分形与水分物理特征,发现土壤颗粒分形维数与总孔隙度、饱和蓄水量呈现明显的正相关趋势,与土壤密度呈现明显的负相关趋势,主要影响因素为黏粒含量;夏江宝等^[5]研究红壤丘陵区不同植被类型土壤颗粒分形与水分物理特征,得到土壤颗粒分形维数与土壤粉黏粒的总孔隙度、饱和蓄水量和孔隙比呈极显著正相关,与石砾质量含量和土壤密度呈极显著负相关;管孝艳等^[6]探讨土壤粒径分布的多重分形谱参数,发现土壤粒径分布程度与土壤黏粒含量密切相关;黎建强等^[7]研究三峡库区植物篱系统土壤颗粒分形特征及其与土壤理化性质的关系,分析得出土壤分形维数与土壤孔隙度、含水量和土壤饱和导水率呈极显著正相关,而土壤容重与分形维数呈显著负相关,土壤有效磷含量和土壤分形维数相关性不显著;伍家辉等^[8]研究不同种植模式对核桃幼林土壤微团聚体组成与分形维数的影响,分析得出土壤分形维数与特征微团聚体组成比例会对土壤自然含水量、孔隙度、养分含量和微生物数量等具有较为明显的影响,均呈现负相关趋势,与体积质量呈极显著正相关;彭家顺等^[9]分析不同刨花楠种植模式对土壤分形维数和可蚀性以及土壤理化性质的影响,得出影响土壤分形维数较显著的2个因素为种植年限和土壤机械组成,土壤分形维数与有机质或者全氮等营养元素含量呈负相关,因为土壤分形维数越大,则土壤越紧实,土壤孔隙度越低;骆莉莎等^[10]研究颗粒形态对粗粒土渗透系数影响,分析得出颗粒形状越复杂,孔隙形状的复杂程度越高,渗透系数越低.

土壤粒度分形维数不仅展示土粒度成分的复杂性特点及非线性作用的特征,而且在认识不同区域的工程地质特征方面发挥着重要作用^[11].从既有研究可发现,土粒度分形维数与土的物理力学参数存在一定的回归关系^[12].目前,对植物修复区尾矿土壤分形维数与物理力学参数之间关系的研究还未见开展.因此,选取现场不同修复年份土壤作为研究对象,采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)获取土体微观结构,并采用图像处理软件来进行定量分析,对土壤孔隙比、渗透系数、密度、内聚力、内摩擦角等物理力学参数进行检测,据此得到土颗粒粒度分形参数与各物理力学参数之间的回归方程,并分析他们之间的关系,为尾矿库植物修复提供依据.

1 采样及试验方案

1.1 采样方案

采样现场位于本钢集团歪头山铁矿尾矿库,地处辽宁省本溪市溪湖区歪头山镇,本溪市北端.采样土壤位置分别记为A, B, C, D,共4个台阶,每个台阶植物的种植年份不同,种植年份由A到D依次减小,每个台阶选取8个有植物的样地,每100 m取1个植物根部土样,清除掉表层杂质,采样深度控制在10~20 cm,土样大约100 g装入密封袋中,采样点按照A1~A8, B1~B8, C1~C8, D1~D8依次编号,共计32个样品.采样位置见图1.

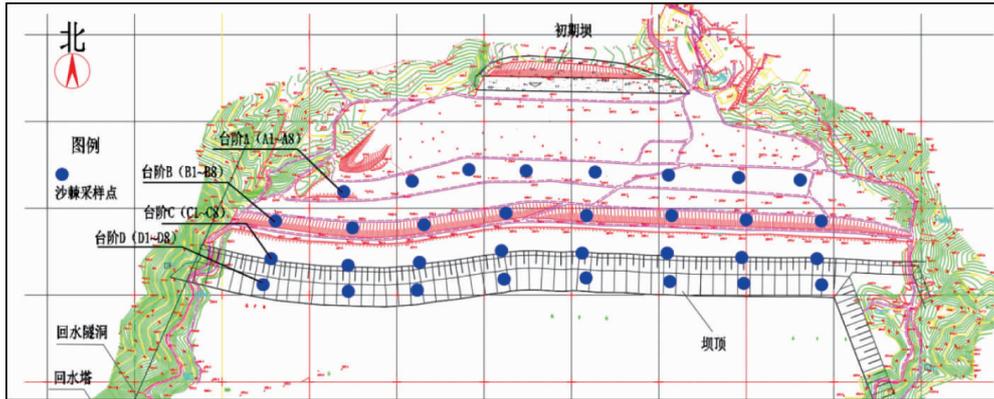


图1 采样点平面布置

1.2 试验方案

1.2.1 SEM 测试

对现场采样土壤,利用 SEM 观测土壤颗粒的表面形貌.预先在分析表面蒸镀一层导电层,厚度为 10~20 nm,防止电子束照射到样品上时形成电子堆积,使入射电子束无法进入,样品内电子无法射出样品表面.导电层一般是金、银、碳和铝等真空蒸镀层,其二次电子发射系数比较高.同时为了满足测试要求,测试前将待测样品在 120 °C 烘箱中干燥 6 h,以防样品中可能存在水分,对测试结果造成影响.测试样品时,所选择的扫描倍数为 500 倍.试验使用仪器为日本日立公司生产的 SEM,型号为 SU8010,如图 2 所示.

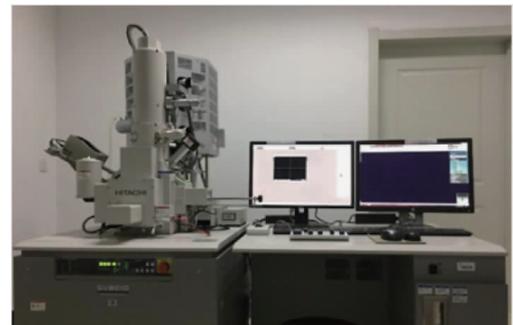


图2 试验仪器 SEM

1.2.2 图像识别及分维提取

使用 PCAS 图像分析软件对 SEM 照片进行结构识别和量化分析,首先使用软件对 SEM 照片选取合适的阈值(T)得到二值图像,其中彩色区域代表孔隙,而黑色区域代表土颗粒,设定孔喉封闭半径和最小孔隙面积,然后提取图像区域中土颗粒的孔隙比与分形维数,以每个台阶第 1 个采样点为例,其 SEM 图像及 PCAS 空隙分布见图 3.

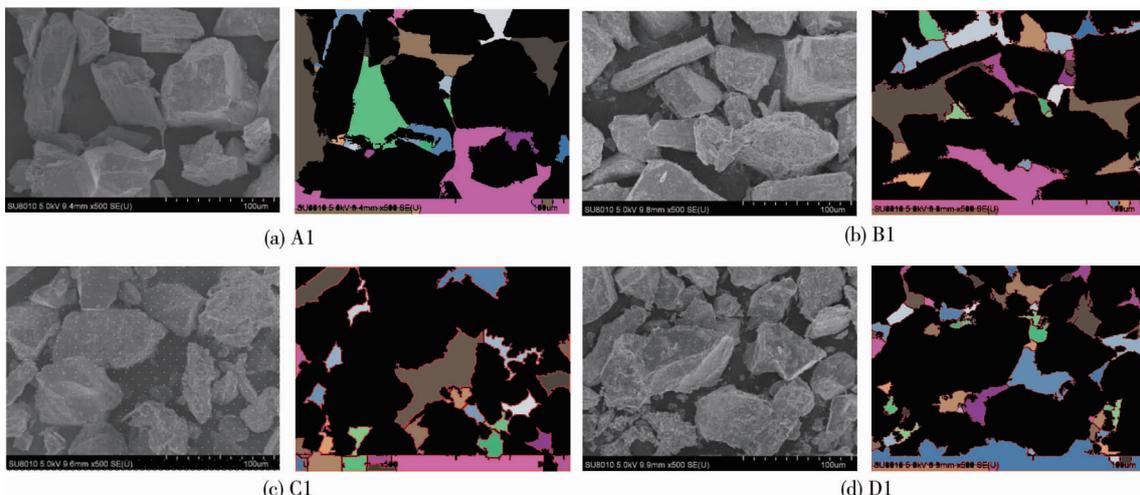


图3 各台阶第1个采样点的 SEM 图像及 PCAS 孔隙分布图像

使用 PCAS 软件对尾矿库植物修复区各采样点土壤 SEM 照片进行分析,得到土壤孔隙相关参数,并按台阶取平均值,分析结果如表 1 所示.

表1 不同台阶土壤孔隙相关系数

台阶	孔隙度/%	概率熵	分形维数	孔隙度分布分形维数
A	33.50	0.908 1	1.299 9	1.028 0
B	32.25	0.958 4	1.363 2	1.387 1
C	27.28	0.943 8	1.386 1	2.169 4
D	27.54	0.958 5	1.406 5	1.837 8

1.2.3 物理力学性质试验

将32个土样按照4个台阶位置分为4组,对4种不同年限沙棘开展相关土工试验,试验过程严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行,以获得可靠的物理力学参数.在环刀内壁涂凡士林切取土样以用来测定土壤颗粒的天然密度,从余土中取代表性试样,利用含水量传感器来测出土壤含水率;采用慢剪法进行直剪试验测定土体内聚力和内摩擦角,分别设定100,150,200,300 kPa的试验正应力,0.05 mm/s的剪切加载速率,最大剪切位移100 mm,抗剪强度为其剪切位移4 mm时所对应的剪应力;通过变水头法测出土体的渗透系数.

2 结果与分析

2.1 分形提取结果

土壤分形维数是一种反映土壤颗粒结构的指标^[13],可用于描述土壤的孔隙度、渗透性、水力特性等性质.土壤分形维数可以综合反映土壤颗粒的组成,能够更具体地描述土壤复杂与不规则的结构.采用扫描电子显微镜SEM来获取土体微观结构,并采用图像处理软件PCAS进行定量分析,得出不同台阶各个采样点的分形维数数据.将不同台阶数设为横坐标,每个台阶取8个采样点的分形维数平均值设为纵坐标,从而显示出不同台阶与分形维数之间的曲线变化情况(图4).

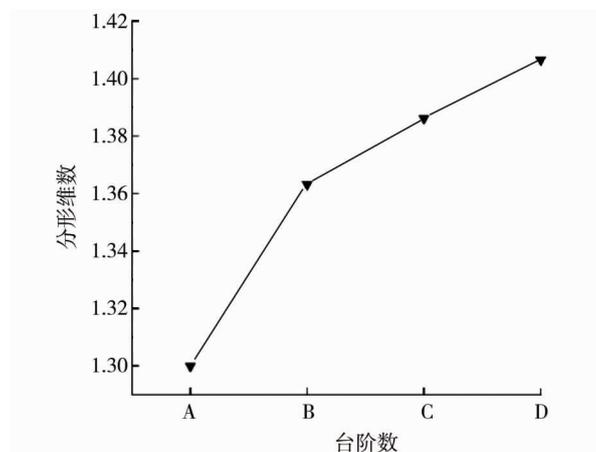


图4 不同台阶与分形维数之间的关系

2.2 物理力学性质试验结果

土壤密度、孔隙结构与渗透系数影响着土壤中水分的流动能力,土体抗剪强度指标(内聚力和内摩擦角)则起到重要的固土稳坡作用^[14],因此选取密度、孔隙比、渗透系数这3个物理参数,内聚力和内摩擦角这2个力学参数进行详细分析.根据32个土样的物理力学参数数据(表2),计算各台阶采样点物理力学参数平均值,分析不同台阶的土壤物理力学参数的变化规律.

2.3 分形维数与物理力学性质的关系

取表2中各台阶采样点物理力学参数平均值(表3),建立各物理力学参数与各个台阶土壤分形维数平均值之间的关系,从而分析其相关性.

表2 不同台阶土壤的物理力学参数

台阶	取样点	含水率/%	天然密度/(kg/m ³)	孔隙比	渗透系数/(cm/s)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
A	A1	15.80	1.40	1.30	0.000 9	15	28.90
	A2	14.60	1.38	1.32	0.002 5	13	31.00
	A3	14.20	1.36	1.34	0.000 9	15	29.50
	A4	16.30	1.38	1.34	0.000 9	14	31.20
	A5	16.60	1.30	1.50	0.000 9	16	31.50
	A6	15.40	1.45	1.21	0.001 0	11	31.70
	A7	14.00	1.40	1.29	0.001 0	10	30.80
	A8	15.90	1.37	1.37	0.001 1	14	32.00
B	B1	16.20	1.69	0.93	0.002 1	13	29.70
	B2	16.30	1.79	0.81	0.002 5	10	29.70
	B3	13.20	1.61	1.00	0.000 9	12	29.90
	B4	16.70	1.63	1.03	0.000 9	12	30.00
	B5	15.50	1.59	1.06	0.000 9	8	30.70
	B6	17.00	1.56	1.13	0.000 9	10	30.90
	B7	15.40	1.61	1.02	0.000 9	9	31.90
	B8	15.00	1.62	1.04	0.001 2	10	30.10
C	C1	17.50	1.68	1.01	0.000 9	7	29.10
	C2	17.20	1.74	0.95	0.002 3	8	28.60
	C3	15.90	1.71	0.93	0.000 9	8	27.10
	C4	16.80	1.70	0.95	0.001 0	14	27.60
	C5	17.50	1.78	0.91	0.001 0	8	27.90
	C6	17.40	1.73	0.95	0.001 0	7	28.60
	C7	17.30	1.72	0.95	0.001 0	8	27.00
	C8	16.90	1.74	0.91	0.001 1	12	28.70
D	D1	17.20	1.79	0.93	0.001 0	12	26.60
	D2	17.90	1.80	0.92	0.002 9	10	27.60
	D3	16.40	1.76	0.94	0.002 7	9	26.90
	D4	15.90	1.71	0.90	0.002 5	7	26.30
	D5	17.70	1.72	0.91	0.002 3	8	24.80
	D6	16.50	1.68	0.92	0.000 9	8	25.50
	D7	17.30	1.70	0.88	0.002 8	7	25.50
	D8	17.90	1.78	0.94	0.001 0	9	26.40

表3 不同台阶土壤的物理力学参数平均值

台阶	含水率/%	天然密度/(kg/m ³)	孔隙比	渗透系数/(cm/s)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
A	15.35	1.38	1.33	0.001 1	13.50	30.83
B	15.66	1.64	1.00	0.001 3	10.50	30.36
C	17.06	1.73	0.95	0.001 1	9.00	28.08
D	17.10	1.74	0.92	0.002 0	8.75	26.20

2.3.1 土壤密度与分形维数之间的关系

图5显示尾矿库生态修复区不同台阶土壤的天然密度与分形维数呈正相关.随着植物生长年限的增加,土壤的分形维数和密度均呈现上升趋势,这一发现与文献[15]的结果相吻合.此外,土壤密度的增加伴随着分形维数的提高,这将对土壤的通气性和保水性产生影响,与彭家顺等人的研究结果一致^[9].为了量化这种关系,提出了以下回归方程: $y=3.841 7x-3.607 3$ (x 与 y 分别为分形维数和土壤密度),相关系数为 $R^2=0.994 1$,表明两者之间的相关性较强.

2.3.2 土壤孔隙比与分形维数之间的关系

图6显示尾矿库生态修复区不同台阶土壤的孔隙比与分形维数之间的关系.彭家顺等^[9]探究不同种植模式下植物对土壤理化性质的影响及对分形维数的影响,研究结果表明,随着土壤分形维数的增大,土壤质地越细,土壤越紧实,土壤孔隙度越呈现下降的趋势^[16].本研究进一步发现,树龄的增加使得土壤的

分形维数也随着增加,土壤分形维数与孔隙比具有明显的负相关趋势,即土壤分形维数越大,孔隙比越小,这一现象可能对营养物质在土壤中的移动和分解产生重要影响.其回归方程为 $y = -3.9377x + 6.4232$ (x 与 y 分别为分形维数和孔隙比);相关系数为 $R^2 = 0.9432$,表明两者之间有较强的相关性.

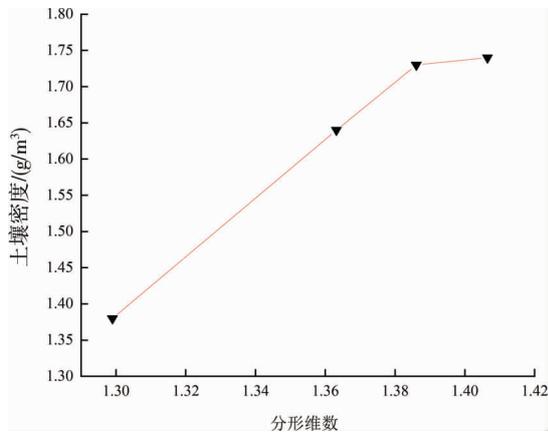


图5 天然密度与分形维数之间的关系曲线

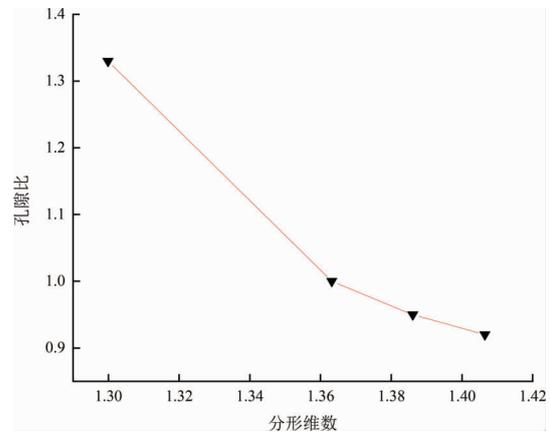


图6 孔隙比与分形维数之间的关系曲线

2.3.3 土壤渗透系数与分形维数之间的关系

图7显示尾矿库生态修复区不同台阶土壤的渗透系数与分形维数呈正相关.根据骆莉莎等^[10]的研究,渗透系数随孔隙比增加呈非线性增长,增幅随着分形维数的增大而显著增大,反映了土壤中水分的渗透性以及运动速度增强,但由于图6中的孔隙比随着分形维数的增加而减小,而渗透系数反而增大,这与已有研究结果相反.其回归方程为 $y = 0.0072x - 0.0084$ (x 与 y 分别为分形维数和渗透系数),相关系数 $R^2 = 0.4093$,相关性较弱.

2.3.4 土壤内聚力与分形维数之间的关系

图8显示尾矿库生态修复区不同台阶土壤的内聚力与分形维数之间的线性关系.由图8可知:内聚力随着分形维数的增大而减小,这是因为影响土体抗剪强度变化的关键因素是含水率,尾矿库生态修复区土壤的分形维数随着含水率的增加而增加,而土壤内聚力随着含水率的增大而减小,这与李叶鑫等^[17]的研究结果相一致.其回归方程为 $y = -46.821x + 74.297$ (x 与 y 分别为分形维数和内聚力),相关系数 $R^2 = 0.982$,有较强的相关性.

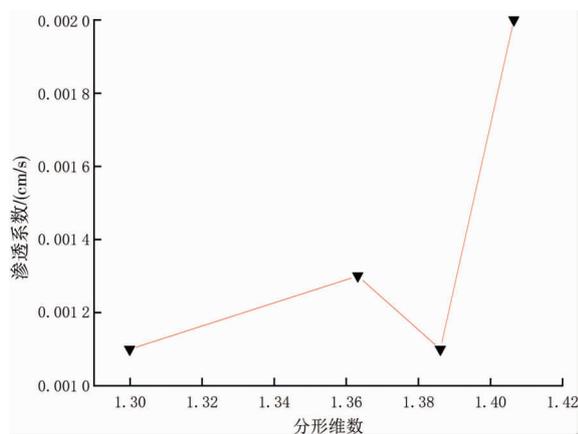


图7 渗透系数与分形维数之间的关系曲线

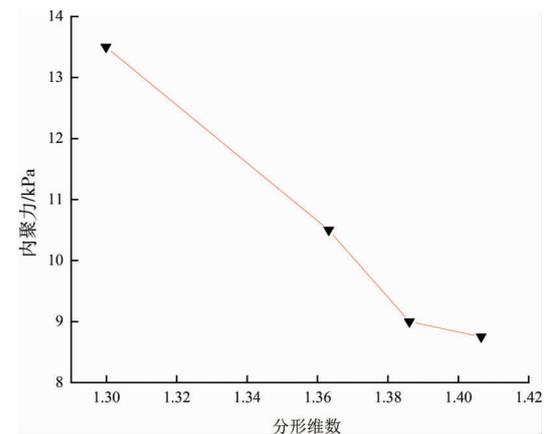


图8 内聚力与分形维数之间的关系曲线

2.3.5 土壤内摩擦角与分形维数之间的关系

图9显示尾矿库生态修复区不同台阶土壤的内摩擦角与分形维数之间的线性关系.由图9可知:随着土壤分形维数的增大,内摩擦角呈减小的趋势,这种变化使土层失去了黏聚力,颗粒之间出现位移,失去稳定性.其回归方程为 $y = -50.882x + 98.55$ (x 与 y 分别为分形维数和内摩擦角),相关系数 $R^2 = 0.8759$,具有较强的相关性.

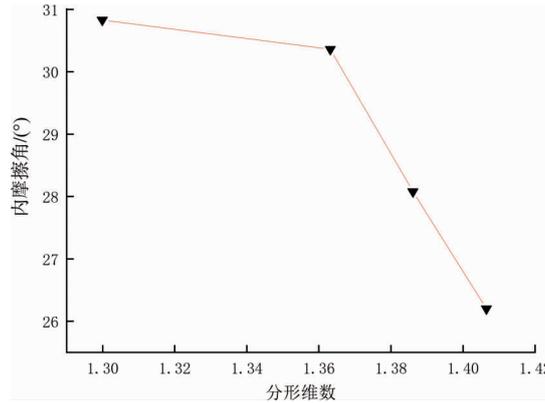


图9 内摩擦角与分形维数之间的关系曲线

3 结论

1) 尾矿库植物修复区土壤分形维数与不同台阶土壤的物理力学参数(密度、孔隙比、内聚力和内摩擦角等)均呈现明显的线性关系,其土壤物理力学指标随着分形维数变化均出现变化,表明土壤分形维数的变化影响土壤结构,说明尾矿库植物修复区土壤分形维数可以反映土壤的微观结构和稳定程度。

2) 尾矿库植物修复区土壤分形维数可作为研究尾矿库生态修复的重要指标,可以通过监测土壤分形维数的变化来评估修复效果,指导修复措施的调整和优化。如选择合适的植物种类、控制种植密度等,以改善土壤结构和提高尾矿库的稳定性。同时,也有助于进一步深入理解土壤微观结构与宏观物理力学性质之间的内在联系,为生态修复土壤检测评价提供依据。

参考文献:

- [1] 邓焱,郝喆,曹明杰,等.尾矿库植物生长与重金属含量的相互关系研究[J].能源环境保护,2020,34(1):8-14.
- [2] 康影丽.晋西黄土区油松根系分布特征及其与土壤理化特性的关系研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- [3] SHEN J F, ZHANG Y, LING C, et al. Comparative study on the fractal dimensions of soil particle size[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(2): 022039.
- [4] 林立文,邓羽松,杨钙仁,等.南亚热带不同林分土壤颗粒分形与水分物理特征[J].生态学杂志,2020,39(4):1141-1152.
- [5] 夏江宝,顾祝军,周峰,等.红壤丘陵区不同植被类型土壤颗粒分形与水分物理特征[J].中国水土保持科学,2012,10(5):9-15.
- [6] 管孝艳,杨培岭,吕焯.基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J].农业机械学报,2011,42(3):44-50.
- [7] 黎建强,张洪江,陈奇伯,等.三峡库区植物篱系统土壤颗粒分形特征及其与土壤理化性质的关系[J].水土保持研究,2014,21(6):129-133.
- [8] 伍家辉,罗永飞,龚伟,等.种植模式对核桃幼林土壤微团聚体组成与分形维数的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(12):69-76.
- [9] 彭家顺,雷开敏,郭晓敏,等.不同刨花楠种植模式对土壤理化性质及分形维数的影响[J].中南林业科技大学学报,2022,42(1):111-119.
- [10] 骆莉莎,周昕,林军.颗粒形态对粗粒土渗透系数影响的数值模拟研究[J].湖南工业职业技术学院学报,2021,21(1):93-96.
- [11] SUN K, WANG H, PEI Z Y, et al. Particle-size fractal dimensions and pore structure characteristics of soils of typical vegetation communities in the Kubuqi Desert[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 10: 1044224.
- [12] 靳杭森.西南红层滑带土物理力学性质与微观结构的相关性研究[D].成都:成都理工大学,2019.
- [13] 陈东乾,张长飞,林端琳.花岗岩残积土粒度分形特征及其与物理力学参数关系研究:以厦门海沧某区域变电站为例[J].福建建筑,2020(2):83-90.
- [14] 田高源.赤泥改良黄土的抗剪强度和渗透特性研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [15] 李刚.沙质海岸防护林不同植被类型土壤物理性质研究[J].水土保持应用技术,2021(5):9-11.
- [16] 胡一鸣,高学文,浦炜钦.不同级配碎石孔隙率和渗透系数的试验研究[J].科技通报,2022,38(3):37-41.
- [17] 李叶鑫,吕刚,宁宝宽,等.排土场土体裂缝区植被根系及抗剪强度分布特征[J].水土保持研究,2022,29(4):108-1140.